

### 3.4.5. AVANCE DE UNA DUNA COSTERA EN 24 HORAS

M. Navarro<sup>1</sup>, J. Román-Sierra<sup>2</sup>, J.J. Muñoz Pérez<sup>2</sup>, G. Gómez Pina<sup>2</sup>, L. Fages<sup>2</sup>

1. Departamento de Física Aplicada. Facultad de Ciencias del Mar y Ambientales. Universidad de Cádiz. Polígono Río San Pedro, s/n, 11510, Puerto Real (Cádiz). [marina.navarro@uca.es](mailto:marina.navarro@uca.es); [jorge.roman@uca.es](mailto:jorge.roman@uca.es); [juanjose.munoz@uca.es](mailto:juanjose.munoz@uca.es)
2. Demarcación de Costas Andalucía Atlántico. C/ Marianista Cubillo, 7, 1106, Cádiz. [ggomez@marm.es](mailto:ggomez@marm.es); [lfages@marm.es](mailto:lfages@marm.es)

#### INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Muchas de líneas de investigación actuales sobre sistemas dunares costeros se centran en gran medida en el estudio de la falta de movilidad eólica que presentan algunos de estos ecosistemas, lo cual puede derivar en importantes procesos erosivos en el litoral. Sin embargo, en otros sistemas dunares, el problema puede radicar en la pérdida de estabilidad y en el consiguiente incremento de movilidad.

En este sentido, las dunas costeras pueden ser tanto estabilizadas como removilizadas, en respuesta a cambios en la fuerza del viento (Levin et al., 2007). Se asume que para una tensión de viento extremadamente alta, la vegetación se destruye y las dunas se reactivan. En estos casos, como sucede en la duna de Valdevaqueros, estas superficies arenosas, que poseen grandes extensiones con pendientes de barlovento bastante constantes, suelen invadir otros ecosistemas adyacentes, como diferentes especies arbustivas, pinares, retamares, marismas, etc. (Cooper y McLaughlin, 1998) o incluso asentamientos humanos (Avis, 1989; Bate y Ferguson, 1996; Hertling y Lubke, 1999).

En las últimas décadas se han realizado numerosos estudios acerca de la movilidad de las dunas costeras, ya sean barjanas (Jiménez et al. 1999; Parteli et al. 2007), dunas longitudinales o en seif (Tsoar et al. 2004), parabólicas (Arens et al. 2004), transversales (Hesp et al. 2010), etc. A pesar de ello, casi todas estas investigaciones se basan en estudios a medio y largo plazo, durante meses, años o décadas, en función de la capacidad de transporte eólico sedimentario de cada sistema dunar. Por ello, debido a características especiales que presenta la zona de estudio (sistema dunar desestabilizado con presencia de fuertes y frecuentes vientos) y tras numerosas observaciones del comportamiento dunar in situ, así como una serie de seguimientos topográficos anuales (Muñoz-Pérez et al. 2009) y mensuales, que desvelaban una elevada actividad eólica, se planteó la necesidad de llevar a cabo un estudio que determinara el movimiento natural de las arenas a más corto plazo. Estas investigaciones han permitido determinar tasas reales de transporte de arena que la duna es capaz de experimentar durante sólo un día.

#### ZONA DE ESTUDIO

La presencia del Estrecho de Gibraltar conduce a un efecto de canalización de los vientos, lo que favorece, junto a otras causas, el desarrollo de importantes sistemas dunares como el de Bolonia y más al sureste, el de Valdevaqueros, ambos en el término municipal de Tarifa (Cádiz). La duna de Valdevaqueros se encuentra situada en la ensenada de su mismo nombre y se localiza a unos 10 km al oeste de Tarifa, en las coordenadas longitud 36°4'15"N y latitud 5°41'30"W (Figura 1). La ensenada es una bahía en Z formada por unos 4 km de playa con una orientación NO-SE. La zona está sujeta a condiciones micro-meso mareales, con valores medios de 1,5 m en mareas vivas y 0,5 m en muertas, debido a la disminución paulatina del rango de marea conforme nos acercamos al Estrecho de Gibraltar. Debido a las fuertes condiciones eólicas que se dan en esta zona hacen que represente un paraíso para los amantes del windsurfing y más recientemente del kitesurfing.



Figura 1. Localización de la zona de estudio

La duna activa de Valdevaqueros tiene una longitud de unos 700 metros y una anchura de aproximadamente 300 m, y se encuentra sujeta a un continuo movimiento provocado por los frecuentes vientos de levante. La zona de estudio se encuentra en un ambiente en el que interactúan varias unidades ambientales (como la playa, con una anchura media de unos 120 m, el río valle, una laguna estacional, un pinar de reciente plantación) y antrópicas (la carretera a Punta Paloma, la carretera nacional hacia Tarifa, un aparcamiento con forma de catavinos y un camping situados frente a la playa). La duna activa de Valdevaqueros ha sido objeto de numerosas actuaciones de restauración y regeneración (mediante instalación de captadores de arena y plantaciones), con la finalidad de minimizar su avance y evitar así la invasión de sus arenas hacia la carretera, actualmente situada junto a la cara de avalancha de la duna (Navarro et al. 2011). A pesar de que estas técnicas de restauración suelen tener mucho éxito en el desarrollo natural de los ecosistemas dunares (Ley et al. 2007), la duna de Valdevaqueros ha seguido avanzando muy rápidamente. La situación de la duna de Valdevaqueros en 2010 puede observarse en la Figura 2.



Figura 2. Situación de la duna de Valdevaqueros en 2010.

La sección de la duna se caracteriza principalmente por un pie de duna que conecta con la playa, una cara de barlovento con una pendiente moderada, la cresta y la cara de sotavento que comunica con la carretera y el pinar.

### METODOLOGÍA

Coincidiendo con la previsión de intensos vientos de levante, se planificó un seguimiento topográfico de 24 horas de duración, concretamente entre el 14 y el 15 de Agosto de 2009. La campaña se llevó a cabo tomando levantamientos con GPSD consecutivos cada hora durante las horas de luz y cada dos horas durante la noche, con el fin de determinar los cambios morfológicos y volumétricos del perfil dunar a muy corto plazo (Figura 3a). Asimismo, se instaló una trampa de arena de fabricación propia durante 30 minutos en tres puntos característicos de una sección transversal de la duna: cresta, cara de barlovento y pie de duna con el fin de obtener las tasas reales de transporte así como un perfil granulométrico dunar a distintos niveles. La trampa, de 50 cm alto x 20 cm ancho x 40 cm de profundidad, que constaba de 5 niveles de dimensiones 10x20 cm, colocados de 0 a 10 cm, de 10 a 20, de 20 a 30, de 30 a 40 y de 40 a 50 cm por encima de la superficie dunar.



Figura 3. a) Levantamientos sucesivos del perfil dunar. b) Colocación de la trampa de arena en distintos puntos del perfil.

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados derivados de los levantamientos sucesivos durante un intervalo de 24 horas mostraron cambios significativos en el borde de la cresta dunar en relación con el resto del perfil (Figura 4). El borde dunar se limita por un margen brusco que coincide en muchos casos, sobre todo en barjanes, con la cresta dunar (Herrmann et al. 2005) y separa la cara de deslizamiento o avalancha de la cara de barlovento. Como en el caso estudiado por Olivier y Garland (2003), las secciones transversales muestran que los cambios de altura mayores suelen ocurrir justo en el borde de la cresta o cerca de ella.

Teniendo en cuenta que durante este seguimiento de 24 horas la duna sólo ha experimentado cambios volumétricos producidos por la dinámica eólica, se ha calculado que el perfil ha presentado una acreción total de  $22,25 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ día}^{-1}$ , de los cuales unos  $10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ día}^{-1}$  se detectaron en la zona del borde de la cresta dunar.

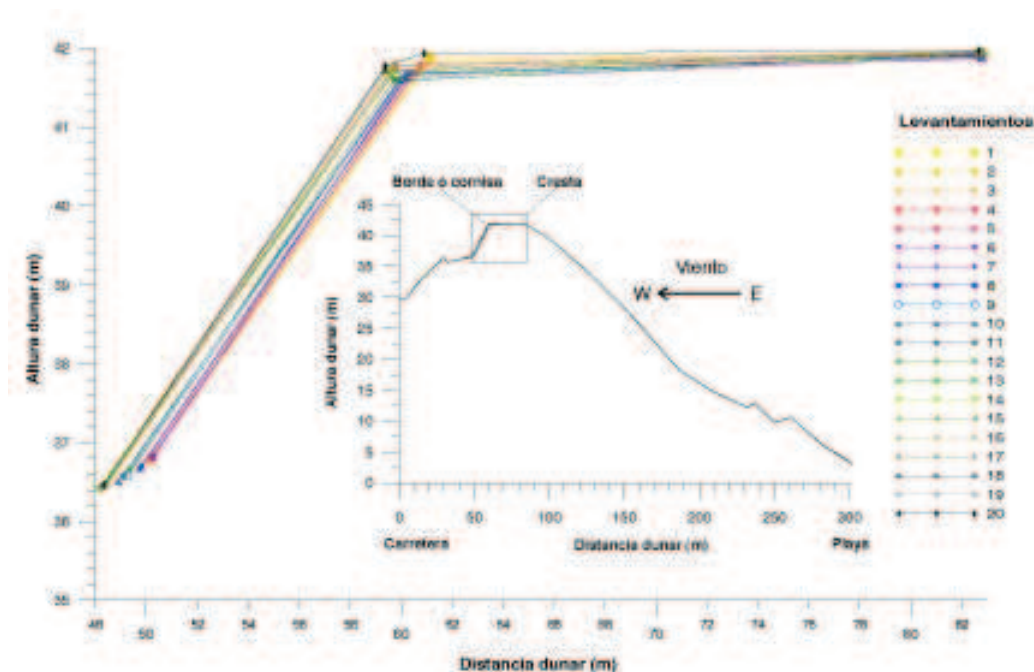


Figura 4. Evolución del borde de la cresta en relación al perfil dunar durante el seguimiento de 24. La campaña fue realizada durante 24 h bajo fuertes vientos de levante.

Con el fin de comparar el desarrollo tanto horizontal como vertical de la duna en distintos puntos del perfil, se han medido las variaciones en los puntos centrales del pie de duna, cara de barlovento, borde o cornisa de la cresta dunar y la cara de avalancha o de sotavento entre cada levantamiento. Dichas distancias han sido determinadas mediante el método euleriano, salvo los desplazamientos de la cresta dunar, que se han calculado mediante el método lagrangiano.

Según los resultados representados en la Figura 5, el borde de la cresta dunar y la cara de avalancha se han desplazado hacia el interior aproximadamente 1,75 metros tan sólo 24 horas después del inicio de la campaña. Esto significa que la tasa de avance dunar en estos puntos ha sido de  $7,3 \text{ cm h}^{-1}$  durante el temporal de levante. Como resultado del avance de la cresta, se ha obtenido una tasa de transporte de arena de  $10,25 \text{ m}^3 \text{ m}^{-1} \text{ día}^{-1}$  que se efectuó desde el borde de la cresta dunar a la cara de avalancha o deslizamiento. Por el contrario, el pie de duna y la cara de barlovento han mantenido su posición e incluso han tendido a extenderse algunos pocos centímetros hacia la playa durante todo el seguimiento. Según Tsoar (1985), teniendo en cuenta que la cara de barlovento alcanza un régimen estacionario y que la cara de deslizamiento avanza a un ritmo más elevado, el resultado es de un mayor avance del borde o cornisa en relación al resto de la cresta. De este modo,

se identifica con el hecho de que cada duna sujeta a vientos unidireccionales muestra un perfil de régimen estacionario, manteniendo la forma y el tamaño a medida que la duna avanza.

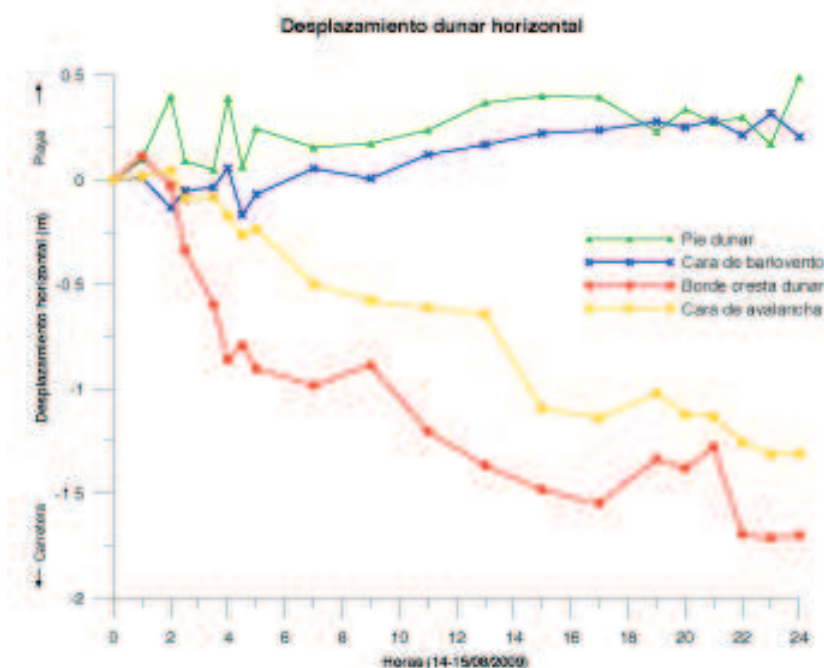


Figura 5. Desplazamiento horizontal en las principales zonas del perfil dunar durante el seguimiento de 24h.



En la Figura 6 se muestran dos fotografías tomadas durante el seguimiento a muy corto plazo tras la colocación de una estaca de madera en el borde de la cresta dunar. En la primera se aprecia un avance dunar de aproximadamente 20 cm tan sólo 2 horas después y en la segunda de 1 m unas 10 horas después de la fijación del punto de referencia.



Figura 6. Avance del borde de la cresta dunar tras la colocación de la estaca de madera: a) Transcurridas unas 2 horas; b) Transcurridas 10 horas

En cuanto al desplazamiento vertical (Figura 7), el pie de duna y la cara de barlovento vuelven a mantener prácticamente su altura, mientras que la cresta dunar se ha reducido 30 cm en altura y la cara de avalancha ha crecido 60 cm. Esto coincide con los resultados del desplazamiento horizontal, ya que la cresta dunar pierde arena en altura para avanzar hacia tierra adentro. De hecho, Watson (1987) señaló que las dunas no pueden aumentar indefinidamente en altura en zonas de vientos unidireccionales, ya que el área de la cresta dunar siempre estará en proceso de erosión. Además, tal como apuntaba Van Dijk et al. (1999) los vientos unidireccionales, (al contrario con lo que sucede si se tratara de vientos con direcciones cambiantes) son más efectivos a la hora de producir un brusco aumento del transporte en la cresta dunar, lo que provoca un descenso relativo de su altura.

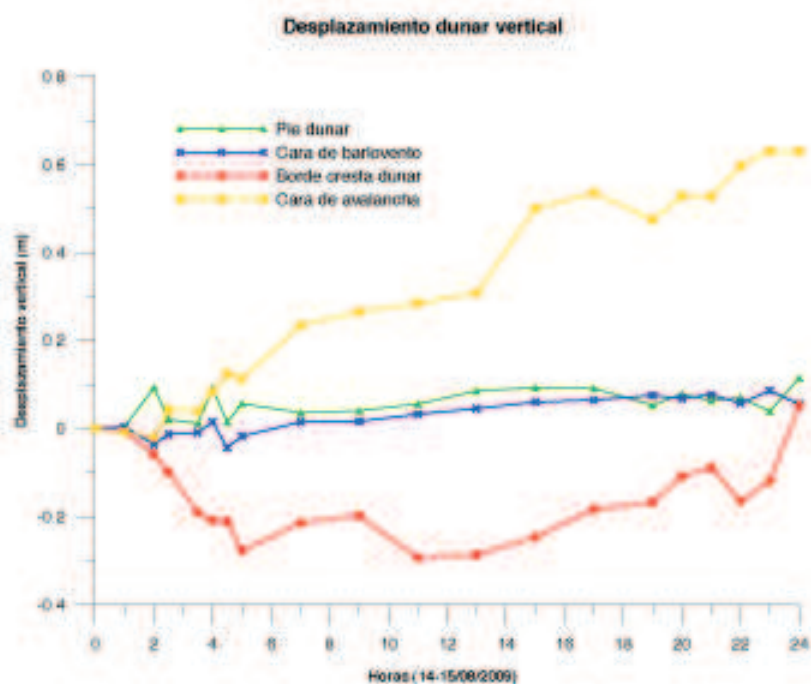


Figura 7. Desplazamiento vertical en las principales zonas del perfil dunar durante el seguimiento de 24h.

En cuanto a los resultados obtenidos tras la medición y análisis granulométrico de la arena captada por la trampa de arena, se ha comprobado que el volumen de sedimentos retenido en la cresta dunar es prácticamente el doble que el observado en la cara de barlovento y más de 6 veces mayor al retenido en el pie de duna. Además, el diámetro medio de la arena (D50) retenida en cada nivel muestra tamaños medios de grano relativamente mayores en el pie de duna que en la cara de barlovento o en la cresta dunar.

Tal como se deduce de la Figura 8a, de un total de 1,3 kg recogidos por la trampa de arena en el pie de duna durante media hora, casi la mitad han quedado retenidos en los primeros 10 cm por encima de la superficie dunar. El resto ha ido acumulándose de forma exponencialmente negativa con la altura (Figura 8b), hasta obtenerse un 6% del total en el último nivel, entre los 40 y 50 cm. La granulometría de la arena recogida en el pie de duna demuestra que el tamaño medio de grano disminuye paulatinamente al aumentar la altura, de modo que se han encontrado valores de D50 de 0,33 mm de los 0 a 10 cm y de 0,29 mm entre los 40 y 50 cm de altura.

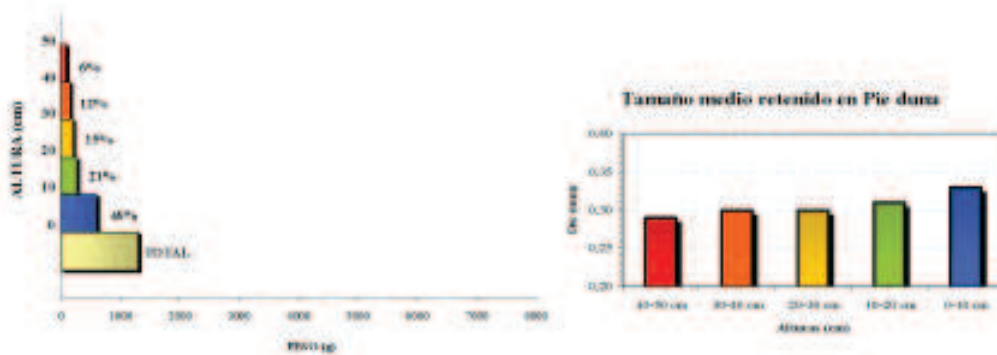


Figura 8. a) Distribución de pesos retenidos por la trampa de arena en el pie de duna durante 30 minutos. b) Tamaño medio (D50) de la arena recogida en cada nivel de la trampa de arena en el pie de duna.

En la cara de barlovento el volumen total de sedimento desplazado durante 30 minutos ha sido de 4,43 kg, de los cuales más de la mitad ha sido retenido en los primeros 10 cm y más del 75% del peso total en los primeros 20 cm (Figura 9a). En el último nivel (40-50 cm) se ha acumulado el 5%. El tamaño medio de grano (D50) ha ido descendiendo progresivamente al aumentar la altura, encontrándose valores de entre 0,28 y 0,31 mm, de modo que los granos más finos han sido transportados por suspensión a mayor altura (Figura 9b).

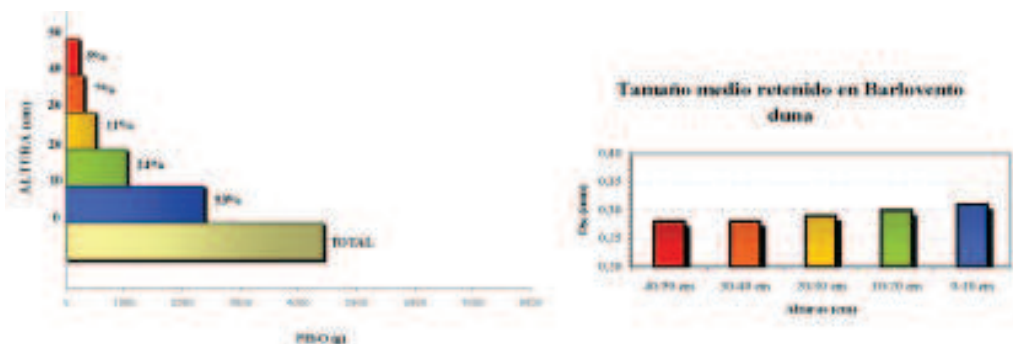


Figura 9. a) Distribución de pesos retenidos por la trampa de arena en la cara de barlovento durante 30 minutos. b) Tamaño medio (D50) de la arena recogida en cada nivel de la trampa de arena en la cara de barlovento.

En cuanto a la cresta dunar, se ha llegado a recoger casi 8 kg de arena en tan sólo media hora (Figura 10a). La distribución del sedimento en función de la

altura ha sido relativamente más homogénea que en el pie o en la cara de barlovento, acumulándose un 38% en los primeros 10 cm (Figura 10b). Los porcentajes acumulados en los niveles superiores también han sido mayores que en las otras dos zonas del perfil, lo que demuestra que el transporte en la cresta se produce de forma masiva y a lo largo de un mayor rango de alturas. Los resultados granulométricos de la arena retenida en cada nivel de la trampa situada en la cresta han sido bastante similares, lo que nos da idea de que los materiales que se transportan hasta la cresta están bastante bien clasificados, con un D50 de 0,28 mm en todos los niveles excepto en los primeros 10 cm, donde se ha encontrado arena ligeramente más gruesa (0,29 mm).

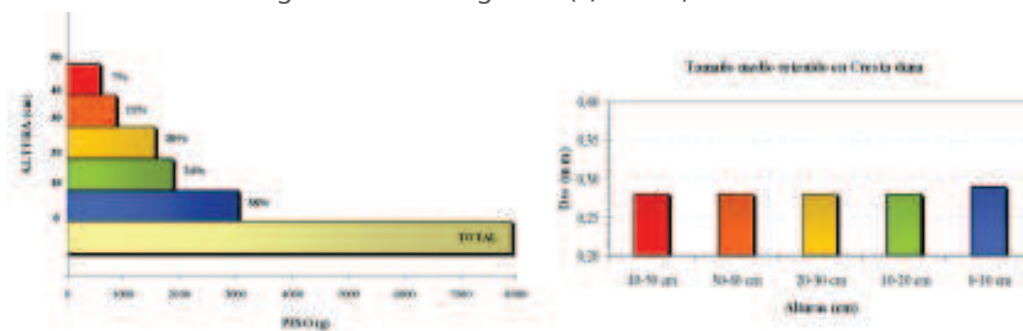


Figura 10. a) Distribución de pesos retenidos por la trampa de arena en la cresta durante 30 minutos. b) Tamaño medio (D50) de la arena recogida en cada nivel de la trampa de arena en la cresta.

## CONCLUSIONES

Tras un seguimiento topográfico intensivo del perfil dunar durante un periodo de 24 horas se ha determinado que al alcanzar su máxima elevación en la cresta, ésta tiende a reducir su altura a favor de un desplazamiento horizontal tierra adentro. Estos cambios son incluso apreciables a escala horaria, donde se ha comprobado que el avance dunar es mucho más significativo (escala métrica) en la zona del borde de la cresta y en la cara de avalancha a sotavento que en el resto del perfil. De este modo, la duna experimentó una acreción total del perfil de 22,25 m<sup>3</sup> m<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>, casi la mitad de los cuales se detectaron tan sólo en el borde de la cresta dunar.

A partir del análisis de los datos obtenidos in situ mediante la instalación de la trampa de arena durante un temporal de levante, se ha obtenido que el volumen de arena retenido depende en gran medida de la zona del perfil transversal de la duna, siendo éste máximo en la cresta, seguido por la cara de barlovento y el pie dunar. Además, alrededor del 50% del transporte sedimentario ocurre en los primeros 10 cm por encima de la superficie dunar, donde el tamaño medio de grano tiende a descender con la altura (D50= 0,33 - 0,28 mm), excepto en la cresta, donde los sedimentos que alcanzan este punto se encuentran muy bien clasificados.

## REFERENCIAS

- Arens, S. M., Slings, Q. y de Vries, C.N., 2004. Mobility of a remobilised parabolic dune in Kennemerland, The Netherlands. *Geomorphology* 59, 1. 1-4, 175-188.
- Avis, A.M., 1989. A review of coastal dune stabilization in the Cape Province of South Africa. *Landscape and Urban Planning*, vol. 18, 1.1, 55-68.
- Bate, G. y Ferguson, M., 1996. Blowouts in coastal foredunes. *Landscape and Urban Planning* 34, Issues 3-4, 215-224.
- Cooper, J.A.G. y McLaughlin, S., 1998. Contemporary multidisciplinary approaches to coastal classification and environmental risk analysis. *J. of Coastal Re-*

search, 14(2), 512-524.

Hertling, U.M. y Lubke, R.A., 1999. Use of *Ammophila arenaria* for Dune Stabilization in South Africa and Its Current Distribution—Perceptions and Problems. *Environmental Management* 24, No. 4, 467–482.

Hesp. P.A., Martínez, M., Miot da Silva, G., Rodríguez-Revelo, N., Gutiérrez, E., Humanes, A., Laínez, D., Montaña, I., Palacios, V., Quesada, A., Storero, L., González, G. y Trochine, C., 2010. Transgressive dunefield landforms and vegetation associations, Doña Juana, Veracruz, México. *Earth Surface Processes and Landforms* n/a. doi: 10.1002/esp.2035.

Jiménez, J.A., Maia, L.P., Serrà, J., Morais, J., 1999. Aeolian dune migration along the Ceará coast, north-eastern Brazil. *Sedimentology* 46, 689-701

Ley, C., Gallego Fernández, J.B. y Vidal Pascual, C., 2007. Manual de restauración de dunas costeras, 2007. *Ministerio de Medio Ambiente. Dirección General de Costas*.

Levin, N., Kidron, G.J. y Ben-dor, E., 2007. A field quantification of coastal dune perennial plants as indicators of surface stability, erosion or deposition. *Sedimentology*, 55(4), 751-772.

Muñoz-Pérez, J.J., Navarro, M., Román-Sierra, J., Tejedor, B., Rodríguez, I. y Gómez-Pina, G., 2009. Long-term evolution of a transgressive migrating dune using reconstruction of the EOF method. *Geomorphology* 112, 167–177.

Navarro, M., Muñoz-Pérez, J.J., Román-Sierra, J., Tsoar, H., Rodríguez, I. y Gómez-Pina, G., 2011. Assessment of highly active dune mobility in the medium, short and very short term. *Geomorphology* 129 (1-2), 14-28.

Parteli, E. J. R., Durán, O., Herrmann, H.J., 2007. Minimal size of a barchan dune. *Phys. Rev. E* 75, 011301.

Tsoar, H., 1985. Profiles analysis of sand dunes and their steady state significance. *Geographiska Annaler. Series A, Physical Geography* 67, n° ½, 47-59.

Tsoar, H., Blumberg, D.G. and Stoler, Y., 2004. Elongation and migration of sand dunes. *Geomorphology* 57, 293–302.

Van Dijk, P.M., Arens, S.M. y Van Boxel, J.H., 1999. Aeolian processes across transverse dunes. II: Modelling the sediment transport and profile development. *Earth Surface Processes and Landforms* 24, 319-333.

Watson, A. 1987. Discussion: variation in wind velocity and sand transport on the windward flanks of desert sand dunes. *Sedimentology* 34, 511-20.